Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği
20. Ulusal Konferansı

15-16 Ekim 2026
Sakarya Üniversitesi

YÜKSEK KAPASİTELİ BÜYÜK ÖLÇEKLİ BİR DİREKT KESME DÜZENEĞİ TASARIMI

DESIGN OF A HIGH-CAPACITY LARGE-SCALE DIRECT SHEAR TEST APPARATUS

Anıl Ekici[1], Nabi Kartal TOKER[2], Ertaç TUÇ[3], Ömer Can Pamuk[4]

ÖZET

İri daneli zeminlerin yüksek gerilme koşulları altındaki kayma dayanımı ve deformasyon davranışının doğru bir şekilde belirlenmesi; ölçek etkileri, dane kırılması ve deney ekipmanlarının kapasite sınırlamaları nedeniyle önemli bir zorluk oluşturmaktadır. Bu çalışmada, 1.0 m ve 1.5 m çapında kesme yüzeylerine sahip numunelerin hem kuru hem de suya doygun koşullarda test edilebildiği yüksek kapasiteli büyük ölçekli bir direkt kesme düzeneğinin tasarımı ve performans değerlendirmesi sunulmaktadır. Geliştirilen düzenek; betonarme ve çelik elemanlardan oluşan bir reaksiyon sistemi, hidrolik yükleme üniteleri ile eksantrik yük aktarımını engelleyen ve büyük deplasmanlara izin veren üst yarısı asılı kesme kutularından oluşmaktadır. Yüksek normal gerilmeler altında numune bütünlüğünü bozmadan alt ve üst kesme kutuları arasında kontrollü boşluk oluşturulmasına imkân veren bir yöntem kullanılmıştır. Gerçekleştirilen deneylerde, 1 m çapındaki numune üzerinde 2600 kPa'ı aşan normal gerilme seviyelerine ulaşılmıştır. Tekrarlanan deneyler tutarlı sonuçlar vermiş ve büyük ölçekli deneyler ile küçük ölçekli deneyler uyumlu sonuçlar ortaya koymuştur. Bulgular, Mohr–Coulomb yenilme zarfının doğrusal olmayan bir davranış sergilediğini ve normal gerilmedeki artışla birlikte dane kırılmasının belirgin biçimde arttığını ortaya koymaktadır. İncelenen zeminlerde, dane kırılmasına bağlı olarak ince dane içeriğinde yaklaşık %6'ya varan artışlar gözlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, güvenilir kayma dayanımı parametrelerinin belirlenebilmesi için deneylerin, saha koşullarındaki gerilme aralıklarını temsil edecek düzeylerde gerçekleştirilmesinin önemini vurgulamaktadır.

Anahtar Kelimeler: *Büyük ölçekli direkt kesme testi, İri daneli zeminler, Kesme mukavemeti, Yüksek kapasiteli düzenek*

ABSTRACT

Accurate characterization of the shear strength and deformation behavior of coarse-grained soils under high stress conditions remains a significant challenge due to scale effects, particle breakage, and limitations of conventional testing equipment. This study presents the design and performance evaluation of a high-capacity large-scale direct shear apparatus capable of testing specimens with shear surface diameters of 1.0 m and 1.5 m under both dry and saturated conditions. The apparatus incorporates a reaction system consisting of reinforced concrete and steel elements, hydraulic loading units, and floating upper shear box that enables large displacements while eliminating friction and load eccentricity. A gap generation technique is used to create a uniform separation between shear box halves without disturbing the specimen under high normal stresses. Normal stress levels exceeding 2600 kPa were reached on the 1-m-diameter specimen in the tests performed. Experimental results demonstrate high repeatability, with strong agreement observed between

[1] Dr., TED Üniversitesi, anil.ekici@tedu.edu.tr (Sorumlu yazar)
[2] Doç. Dr., Ortadoğu Teknik Üniversitesi, toker@metu.edu.tr
[3] İnş. Yük. Müh., TOKER Sondaj ve İnşaat Müh. Müş. A.Ş., ertactuc@toker.com.tr
[4] İnş. Yük. Müh., TED Üniversitesi, omer.pamuk@tedu.edu.tr

large-scale and conventional small-scale tests. The findings indicate that the Mohr–Coulomb failure envelope exhibits nonlinear behavior, with particle breakage increasing markedly with normal stress. Fines content increased by up to approximately 6% due to particle breakage. Results in this study highlight the importance of testing under field-representative stress ranges to obtain reliable shear strength parameters.
Keywords: *Large-scale direct shear testing, Coarse-grained soils, Shear strength, High-capacity apparatus*

1. GİRİŞ

İri daneli zeminlerin kayma dayanımı ve deformasyon davranışına ilişkin güvenilir ölçüm verileri; zemin yapılarının güvenli ve ekonomik tasarımı için büyük önem taşımaktadır. Bununla birlikte, yüksek gerilme koşulları altında bu zeminlerin davranışının tahmin edilmesi; karmaşık dane etkileşimleri ile yüksek gerilmeler altında meydana gelen dane kırılma mekanizmaları nedeniyle önemli zorluklar barındırmaktadır. Dane boyutu ve çevre basıncı arttıkça, daha büyük danelerin temas noktalarında oluşan yüksek gerilmeler nedeniyle dane kırılma etkisi de artmaktadır (Gupta, 2016). Maksimum dane boyutunun kayma dayanımı ve içsel sürtünme açısı üzerinde etkili olduğu, ayrıca iri daneli zeminlerin gerilme-deformasyon davranışının normal gerilme düzeyine bağlı olarak değiştiği çeşitli çalışmalarda gösterilmiştir (Andjelkovic vd., 2018).

Direkt kesme deneyi, zeminlerin kayma dayanımının belirlenmesinde yaygın olarak kullanılmakla birlikte, kesme kutusu boyutları büyük danelerin deney numunesinde temsil edilmesini sınırlar. ASTM D3080 (2004) kutu boyutunun maksimum dane çapının en az 10 katı olmasını önermektedir. Daha büyük danelerin test edilebilmesi için kesme kutusunun büyütülmesi gerekir; ancak bu durum da uygulanabilir normal gerilme aralığını sınırlar. Bu nedenle geoteknik pratikte dane boyu dağılımının küçültülmesine dayalı ölçekleme yöntemleri kullanılmaktadır. İri danelerin uzaklaştırılması veya küçültülmesi, dane boyu dağılımını değiştirerek zeminin mekanik davranışının tam olarak temsil edilememesine yol açabilir.

Deney ölçeğinin büyüklüğü yalnızca maksimum dane boyutu açısından değil, sınır etkilerinin azaltılması ve serbest kayma bandı oluşumu açısından da önem arz etmektedir. Ölçek etkilerinden kaçınmak için, ASTM D3080 (2004) önerisinden daha kısıtlayıcı şekilde, Fu vd. (2015) numune çapının maksimum dane boyutunun en az 20 katı olmasını önerirken, Deiminiat vd. (2022) bu oranın 60'ın üzerinde olması gerektiğini belirtmiştir. Ayrıca kayma bandı kalınlığının ortalama dane boyutuyla (D_{50}) ilişkili olduğu ve yaklaşık 10–20 D_{50} mertebesinde olabildiği rapor edilmiştir (Desrues ve Viggiani, 2004).

Deneylerin arazide beklenen normal gerilme düzeylerini temsil eden koşullarda gerçekleştirilmesi de önem taşımaktadır. Düşük gerilme düzeylerinde elde edilen doğrusal bir Mohr-Coulomb yenilme zarfının uzatılarak yüksek gerilmelerdeki dayanımın tahmini, iri daneli zeminlerin doğrusal olmayan dayanım davranışı nedeniyle kayma direncinin olduğundan yüksek tahmin edilmesine yol açabilir (Maksimovic, 1989). Bu nedenle, özellikle zeminin dane boyu dağılımının mümkün olduğunca korunması ve arazideki gerilme ve doygunluk koşullarına yakın şartlarda deneylerin gerçekleştirilmesi, güvenilir dayanım parametrelerinin belirlenebilmesi açısından önem taşımaktadır.

Bu çalışmada, büyük kesme yüzeylerine yüksek normal ve kesme yüklerinin uygulanabildiği, ayrıca doygun numuneler üzerinde deney yapılmasına olanak sağlayan bir direkt kesme düzeneğinin tasarım ve performans detayları sunulmaktadır. Düzenek 1.0 m ve 1.5 m çaplı kesme yüzeylerine test yapılabilecek şekilde tasarlanmıştır. Çalışmanın amacı, geliştirilen düzeneğin yapısal özelliklerini ve deneysel çalışma esaslarını kısaca

sunmak ve yüksek gerilmeler altında gerçekleştirilen performans deneyleri ile küçük ölçekli direkt kesme deneylerine dayalı karşılaştırma sonuçlarını ortaya koymaktır.

2. EKİPMAN ÖZELLİKLERİ

2.1. Genel Özellikler

Ekipman betonarme bir havuz, çelik reaksiyon kirişi, üst ve alt kesme kutuları ile hidrolik yükleme ve ölçüm elemanlarından oluşmaktadır (Ekici vd., 2026). Deney düzeneğinin genel görünümü Şekil 1'de sunulmuştur. 3.5 m × 4.5 m iç plan boyutlarına sahip betonarme havuz, numune hazırlama işlemlerinin gerçekleştirilmesi ve kuru veya su altında test ortamının sağlanması amacıyla tasarlanmıştır. Düzeneğin zemin seviyesinin altına yerleştirilmesiyle, testlerin üstten ve daha geniş bir görüş açısıyla izlenebilmesi ve numune hazırlama işlemlerinin kolaylaştırılması amaçlanmıştır. Normal yük, betonarme havuzun kolon donatılarına kaynakla bağlanmış 7 m uzunluğundaki çelik kirişten reaksiyon alarak çalışan bir hidrolik kriko aracılığıyla numuneye aktarılmaktadır. Bu sayede, reaksiyon kirişi çekme kuvvetlerini kolonlara, alt kesme kutusu ise normal yükü betonarme havuz temeline aktararak dengeli ve rijit bir taşıyıcı sistem oluşturmaktadır.

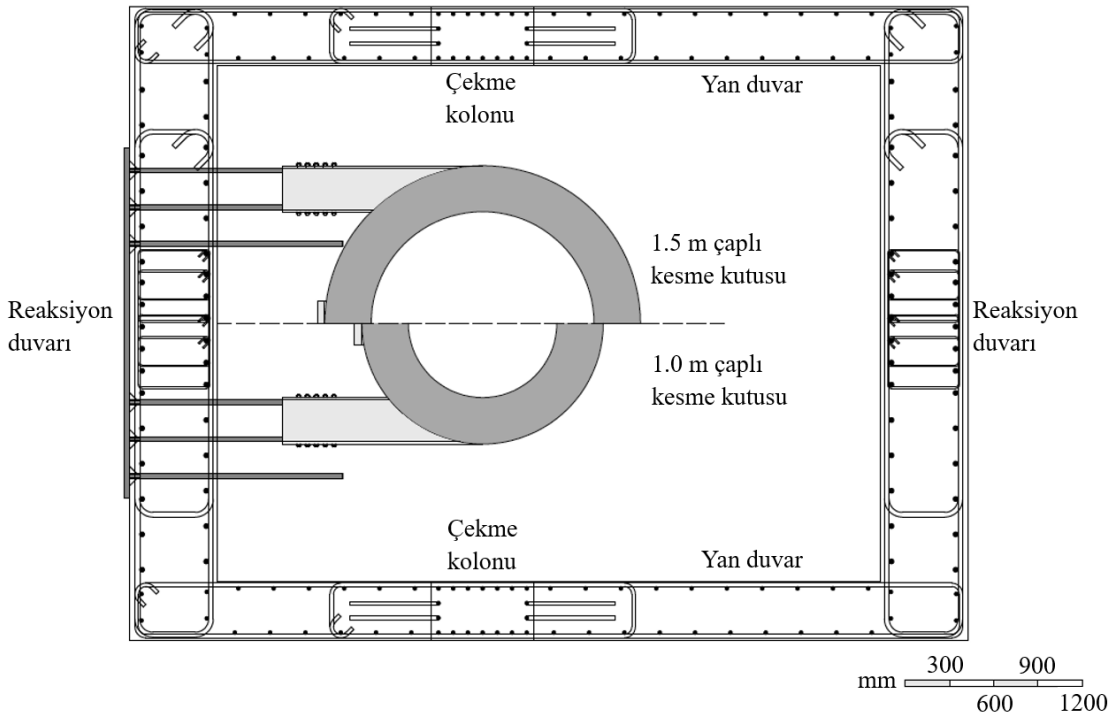


(a) (b)

Şekil 1. Ekipmanın (a) kuru veya nemli ve (b) su altında gerçekleştirilen deneyler için genel görünümü

Alt kesme kutusu, betonarme havuz temeline rijit bir şekilde bağlanmak yerine, reaksiyon duvarı boyunca yerleştirilen çelik çekme plakaları ile sabitlenmiştir (Şekil 2). Çekme kuvvetlerinin, uygulanacak kesme yüküne yaklaştırılmasıyla kısa kollu bir kuvvet çifti oluşturularak reaksiyon duvarına aktarılan yapısal kuvvetler azaltılmaktadır. Alt kutunun havuz temeliyle rijit bir bağlantısının bulunmaması, özellikle su etkilerinden kaynaklanabilecek zamana bağlı korozyon ve dayanım sorunlarının azaltılması açısından da avantaj sağlamaktadır. Ayrıca, bu tasarım, farklı boyutlardaki kutuların kolaylıkla sökülüp takılmasına olanak sağlamaktadır. Bu kapsamda, 1 m çapındaki kutu her iki tarafta bulunan en içteki ikişer çekme plakasına civatalanarak sabitlenirken, 1.5 m çapındaki kutu en dıştaki ikişer çekme plakasına bağlanacak şekilde tasarlanmıştır (Şekil 2).

Kesme kutuları, dairesel bir kesme yüzeyine sahip üst ve alt segmentlerden oluşmaktadır. Test sırasında alt kutu sabit kalırken, üst kutu reaksiyon duvarına karşı çalışan bir hidrolik kriko tarafından yatay olarak hareket ettirilmektedir. Üst yükleme plakasının üzerindeki iki plaka arasına yerleştirilen silindirik çubuklar, üst kutunun kesme yönünde minimal bir sürtünme kuvvetiyle hareket etmesini sağlamaktadır (Şekil 1).

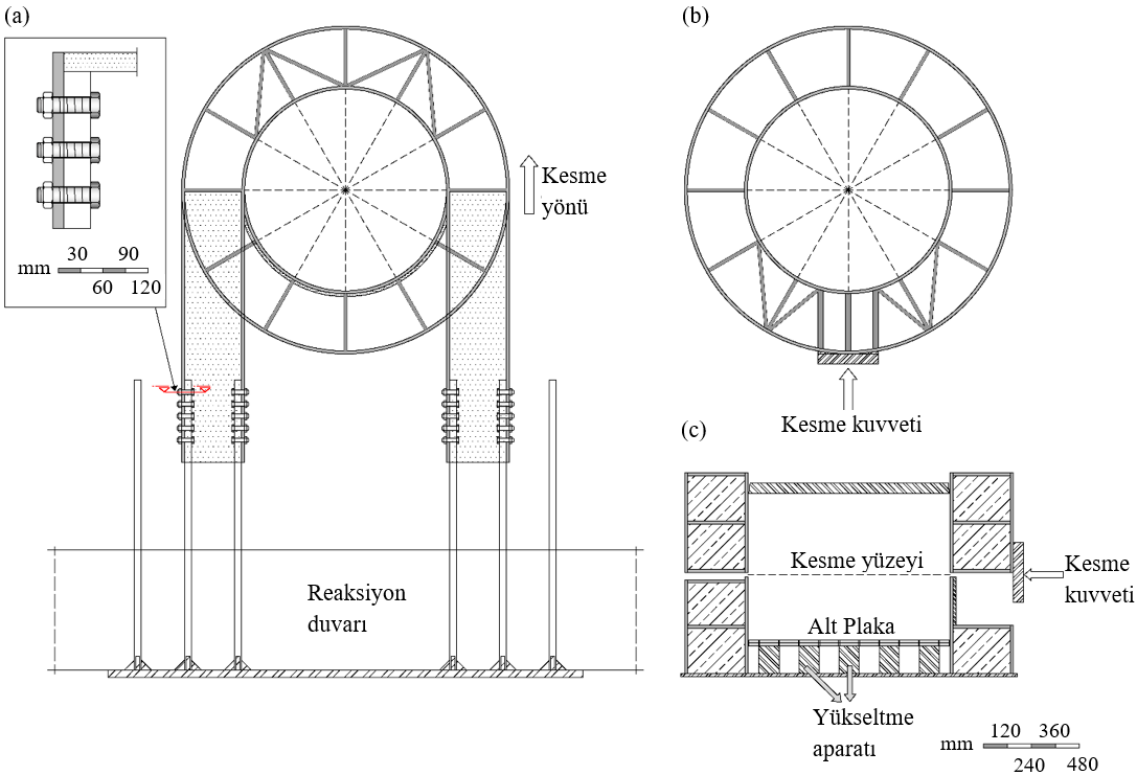


Şekil 2. Ekipmanın plan görünümü ve donatı yerleşimi

Betonarme havuzun ve çelik kesme kutularının tasarımı, sonlu eleman analizleri ile gerçekleştirilmiştir. Kesme yönüne dik duvarlar reaksiyon duvarı, kolonların bulunduğu duvarlar ise yan duvar olarak adlandırılmıştır (Şekil 2). Kesme yükünün uygulanması ve alt kutunun stabilizasyonu aynı tarafta gerçekleştirildiğinden deney sırasında esas olarak tek reaksiyon duvarı etkin olmakla birlikte, karşı duvar da alternatif destek koşullarına olanak verecek biçimde tasarlanmıştır. Betonarme yapının temel kalınlığı 50 cm, reaksiyon ve yan duvar kalınlıkları sırasıyla 60 ve 40 cm'dir. Reaksiyon ve yan duvarlarda 32 ve 24 mm çaplı donatılar kullanılmış, yüklerin yoğunlaştığı bölgelerde ek donatı ve sık etriyeler düzenlenmiştir.

2.2. Kesme Kutularının Tasarımı

1.0 m çapındaki kesme kutusunun düşey kesiti ile alt ve üst segmentlerine ait yatay kesitler Şekil 3'te sunulmaktadır. Alt ve üst kutu yükseklikleri 50 cm'dir. Böylece en fazla 1 m numune yüksekliği elde edilebilmekte, daha düşük numune yükseklikleri ise yükseltilmiş taban kullanılarak sağlanabilmektedir. Kutular 15 mm kalınlığındaki radyal çelik levhaların aynı kalınlıkta eşmerkezli boru kesitlere kaynatılmasıyla oluşturulmuş ve kesme yönündeki rijitliği kutu ağırlığını düşük tutarak artırmak amacıyla halka biçimli bir taşıyıcı düzen kullanılmıştır. Kesme yükünün üst kutuya aktarıldığı bölgede 50 mm kalınlığında bir plaka ve üç düşey levha kullanılmış, çapraz levhalarla yükün kutu çevresine dağıtılması sağlanmıştır (Şekil 3b). Benzer şekilde, alt kutunun kesme kuvvetinin uygulandığı tarafın karşısındaki ve reaksiyon kuvvetinin yoğunlaştığı yan yüzüne çapraz plakalar kaynaklanmıştır (Şekil 3a). Alt kutunun üst bölümünde kesme yükünün uygulandığı tarafta bir açıklık bırakılmış ve bu bölüm yay biçimli bir destek plakası ile güçlendirilmiştir (Şekil 3c). Alt kutudaki bu yarı açık geometri, kesme yükünün kesme düzlemine herhangi bir eksantrisite oluşmaksızın aktarılmasını ve üst kutunun yatay yönde serbestçe hareket etmesini sağlamaktadır. Bu sayede, üst kutu alt kutuya göre kesme yönünde 28 cm'ye kadar hareket edebilmektedir.



Şekil 3. 1 m çapındaki kesme kutusunun (a) alt kutu ve (b) üst kutu yatay kesitleri ile (c) düşey kesiti

2.3. Alt–Üst Kutu Arasında Açıklık Oluşturulması

Standart direkt kesme düzeneklerinde, normal yükün uygulanmasının ardından üst kutunun kaldırılmasıyla aralık oluşturulması yönteminin, bu düzenekteki yüksek yük seviyeleri ve ekipmanın ağır bileşenleri nedeniyle uygulanabilir olmadığı değerlendirilmiştir. Test sırasında alt ve üst kutular arasında oluşabilecek kontrolsüz metal sürtünmesini önlemek amacıyla, deneye başlamadan kutular arasına çıkarılabilir, yay biçimli ayırma aparatları yerleştirilmiştir (Şekil 4a). Ayırma aparatlarının kalınlığı, test edilecek malzemenin dane boyu dağılımına göre değiştirilebilmektedir. Açıklık, kesme sırasında kutular arasında temas ve sürtünme oluşmasını önleyecek ve numuneden açıklığa zemin malzemesi kaybını sınırlandıracak şekilde seçilmelidir. Bu çalışma kapsamında, kullanılan numune özelliklerine bağlı olarak alt ve üst kutu arasında 20 mm açıklık bırakılarak deneyler gerçekleştirilmiştir.

İlk olarak numune hazırlığı öncesinde alt ve üst kutu birbirine kilitlenir. Numune, kutular içerisinde hazırlandıktan ve normal yük uygulandıktan sonra, oturma/konsolidasyon aşamalarının tamamlanması beklenir. Kilitler kaldırılarak alt ve üst kutuların birbirinden bağımsız hareket edebilmesi sağlandıktan sonra, bir hidrolik kriko yardımıyla üst kutuya birden fazla noktadan yukarı yönde kontrollü bir kuvvet uygulanır. Bu kuvvet, yalnızca kutu ayırma aparatları üzerindeki düşey yükü kaldıracak seviyede uygulanarak ayırma aparatlarının çıkarılması sağlanır (Şekil 4b). Bu işlem sırasında üst kutunun düşey konumu komparatör saatleri kullanılarak sürekli olarak izlenir. Üst kutunun numune üzerindeki düşey konumunu koruması, kutunun yan yüzeyleri ile numune arasında oluşabilecek sürtünmeden kaynaklanacak ve kutu ayırma işlemi sırasında meydana gelebilecek olası numune bozulmalarını önlemektedir. Ayırma aparatlarının çıkarılmasıyla birlikte, normal

yüke ilaveten kayar yükleme plakaları, numunenin üst yarısı ve üst kutu ağırlıklarının kesme yüzeyine aktarılması ve alt ve üst kutular arasında sabit kalınlıkta bir aralık oluşturulması sağlanarak serbest bir kesme yüzeyi elde edilmektedir (Şekil 4c).



(a) (b) (c)

Şekil 4. (a) 20 mm kalınlığındaki kutu ayırma aparatları, (b) kutu ayırma aparatlarının çıkarılması ve (c) üst ve alt kutu arasında oluşan aralık

2.4. Yükleme Elemanları ve Enstrümantasyon

Normal ve kesme yükleri hidrolik krikolarla yük kontrollü olarak uygulanmaktadır. Gerçekleştirilen testlerde, 80–350 ton kapasite aralığında ve 0.6–2.2 ton düzeyinde ölçüm hassasiyetine sahip hidrolik krikolar kullanılmıştır. Hidrolik kriko ile üst kutu arasına 0.1 ton ölçüm hassasiyetine sahip yük hücresi yerleştirilmiştir. Deplasman ölçümleri için düşey yönde dört, yatay yönde iki komparatör saati kullanılmıştır. Komparatör saatlerinin ölçüm aralığı 50 mm ve hassasiyeti 0.01 mm'dir. Tüm ölçüm cihazları kalibre edilmiş ve her test öncesinde doğruluk sınırları içinde çalıştıkları kontrol edilmiştir.

3. DENEYSEL YÖNTEM

3.1. Test Prosedürü

Yük kontrollü test prosedürü, hedef normal yüke en az beş kademede ulaşılacak şekilde oluşturulmuştur. Buna göre, her normal yükleme kademesinde 1, 2.5 ve 5. dakikalarda, daha sonra 5 dakikalık aralıklarla ölçüm alınır. On dakikalık ortalama düşey yer değiştirme hızının 0.005 mm/dak değerinin altına düşmesi durumunda ilgili yükleme kademesinin tamamlandığı kabul edilir. Son normal yük kademesinde bu koşul sağlandıktan sonra kesme aşamasına geçilir.

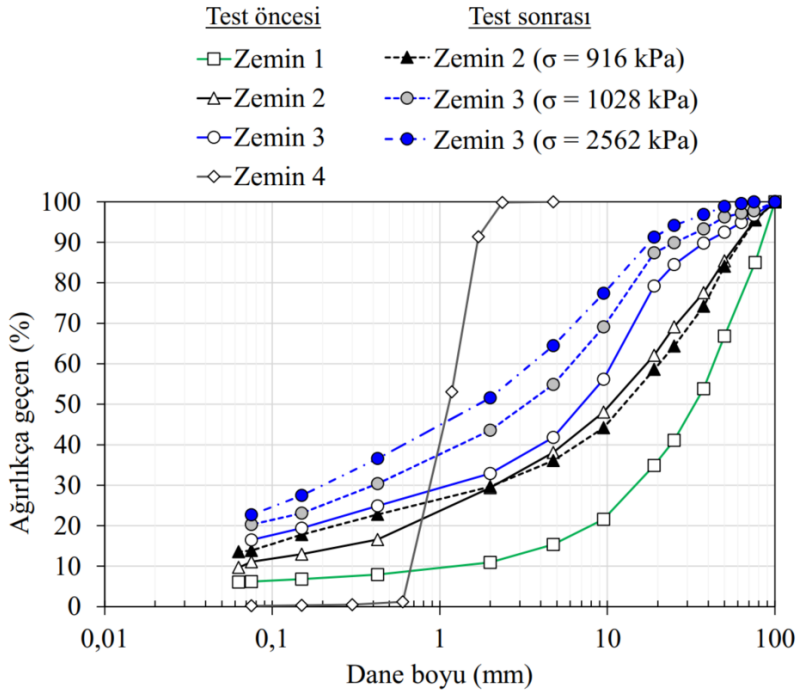
Kesme yükünün her kademesinde 1, 2.5 ve 5. dakikalarda, daha sonra 5 dakikalık aralıklarla ölçüm alınır ve on dakikalık ortalama yatay yer değiştirme hızının 0.1 mm/dak değerine ulaşması bir sonraki yükleme kademesine geçiş ölçütü olarak kabul edilir. Maksimum kesme dayanımına ulaşıldıktan sonraki davranışın belirlenmesi için, sabit yük uygulanmasının yüksek hızlarda (0.5 mm/dak'dan daha yüksek) deformasyona neden olduğu durumlarda: (a) bu kesme yükü adımındaki yer değiştirme, bir önceki kesme yükü adımındaki yer değiştirmeden daha büyük olduğunda veya (b) toplam yer değiştirme, kutu çapının 1/10'una ulaştığında; yer değiştirmeyi durdurmak amacıyla hidrolik basınç ünitesinin vanası kapatılır ve kesme yükü okuması izlenir. Bu yük değeri 1 dakika boyunca sabit kaldığında, yer değiştirme değerleri de kaydedilir. Daha sonra kesmeye, bu yük değeri civarında sabit veya biraz artırılmış kesme yükleri ile devam edilir.

Yukarıda belirtilen kesme yönündeki yer değiştirme kriterleri, iri daneli ve düşük ince dane içeriğine sahip zeminlerde drenajlı koşulların sağlanması amacıyla kullanılmıştır.

Kohezyonlu zeminlerde ise konsolidasyon davranışına bağlı olarak daha düşük kesme hızı kriterleri uygulanmaktadır.

3.2. İncelenen Zeminler ve Numune Hazırlama Prosedürü

Çalışma kapsamında test edilen zeminlerin özellikleri Tablo 1'de, elek analizlerinden elde edilen dane boyu dağılımları ise Şekil 5'te sunulmaktadır. Direkt kesme deneylerinin ardından, deney sırasında meydana gelen dane kırılma derecesini değerlendirmek amacıyla, kesme kutusu içerisine yerleştirilen numuneler üzerinde elek analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizler, Zemin 2 için 916 kPa normal gerilme (σ) altında ve Zemin 3 için σ=1028 kPa ve σ=2562 kPa altında gerçekleştirilen deneylerin ardından, kutu içerisine yerleştirilen numunelerin tümüne uygulanmıştır (Şekil 5).



Şekil 5. İncelenen zeminlerin dane boyu dağılımı

Tablo 1. İncelenen zemin özellikleri

	Zemin 1	Zemin 2	Zemin 3	Zemin 4
Tanım	Kötü derecelenmiş çakıl (GP)	Kötü derecelenmiş çakıl – siltli çakıl (GP-GM)	Killi çakıl (GC)	Kötü derecelenmiş kum (SP)
Atterberg limitleri	Plastik olmayan zemin	Plastik olmayan zemin	*LL* = 28%, *PL* = 19%, *PI* = 9%	Plastik olmayan zemin
Su muhtevası, *w* (%)		6.4	7	0
Kuru yoğunluk, ρ_{dry} (gr/cm^3)	2.06	1.91	2.07	1.41

Kesme sonrası elde edilen sonuçlar, her iki zeminde de ince dane yüzdesinde artış olduğunu göstermiştir. Zemin 2'de, 2 mm'den küçük danelerin oranı deney sonrasında

yaklaşık %3 ila %6 oranında artmıştır. σ=2562 kPa altında test edilen Zemin 3 için, 1–10 mm aralığındaki danelerin ağırlıkça oranı yaklaşık %20 artarken, 0.075 mm'den küçük danelerin oranı yaklaşık %6 artmıştır.

Bunun yanında, dane kırılmasının tüm dane boyu dağılımı üzerindeki etkisini nicel olarak belirlemek amacıyla, Hardin (1985) tarafından önerilen bağıl kırılma (B_r) değeri değerlendirilmiştir. B_r, B_t/B_p olarak hesaplanmakta olup, B_t başlangıç ve nihai dane boyu dağılımı eğrileri arasındaki alan olarak tanımlanan toplam kırılmayı ifade etmektedir. B_p ise kırılma potansiyelini ifade etmekte olup, 0.074 mm dane büyüklüğüne karşılık gelen doğru ile bu sınırın üzerindeki dane boyu dağılım eğrisi arasında kalan alan olarak tanımlanmaktadır. B_r=0 dane kırılmasının olmadığını, B_r=1 ise tüm iri danelerin kırılmasını ifade etmektedir. Buna göre, B_r değerleri Zemin 2 için 0.03; Zemin 3 için ise σ=1028 kPa ve σ=2562 kPa normal gerilmeleri altında sırasıyla 0.14 ve 0.25 olarak hesaplanmıştır.

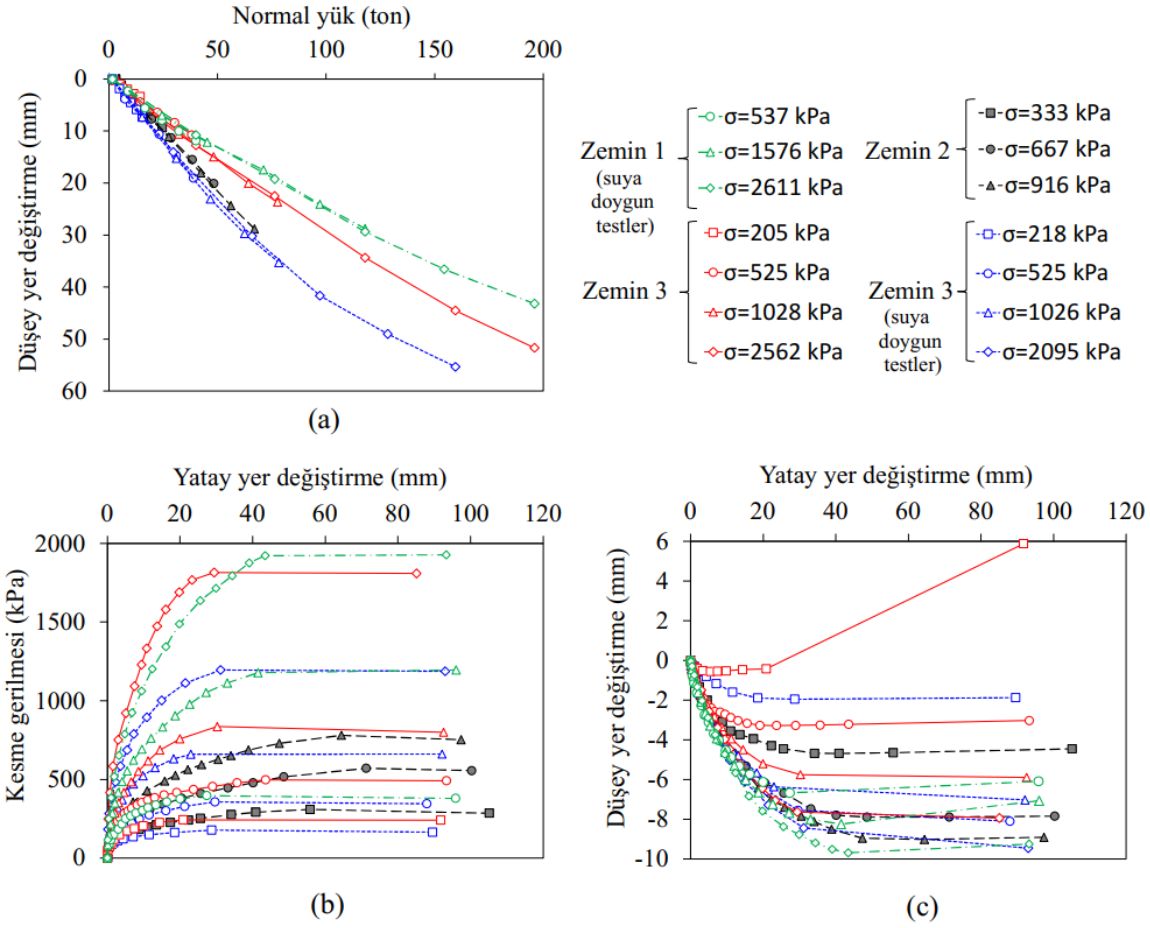
Numune hazırlama sürecinde, numuneler hedef kuru yoğunluğa ulaşacak şekilde tabakalar halinde yerleştirilip sıkıştırılmıştır. Deneylerde Ladd (1978) tarafından önerilen kademeli sıkıştırma yöntemi uygulanmıştır. Bu yönteme göre, alt tabakaların üst tabakaların sıkıştırılmasıyla ilave olarak sıkışacağı öngörülerek başlangıç yoğunlukları belirlenmiş ve tüm numunenin homojen bir hedef yoğunluğa ulaşması sağlanmıştır. Kesme yüzeyinin ardışık tabaka ara yüzlerinden uzakta, bir tabakanın orta seviyesinde bulunmasına dikkat edilmiştir. Hedef numune yüksekliğine ulaşıldığında 50 mm kalınlığındaki çelik üst başlık yerleştirilmiş ve sistem yüklemeye hazır hale getirilmiştir. Suya doygun deneylerde betonarme havuz suyla doldurularak numunenin aşağıdan yukarıya doğru su altında kalması sağlanmıştır.

4. TEST SONUÇLARI

Ekipmanın yüksek normal yükler altındaki performansı Zemin 1, Zemin 2 ve Zemin 3 kullanılarak değerlendirilmiş, testlerin tekrarlanabilirliği ve küçük ölçekli kesme kutularıyla elde edilen sonuçlarla karşılaştırılması ise Zemin 4 kullanılarak incelenmiştir.

Aynı hedef kuru yoğunlukta hazırlanmış, suya doygun olarak test edilen Zemin 1 numuneleri 537, 1576 ve 2611 kPa normal gerilmelerde; Zemin 2 numuneleri 333, 667 ve 916 kPa normal gerilmelerde; Zemin 3 ise 205, 525, 1028 ve 2562 kPa normal gerilmelerde test edilmiştir. Ayrıca Zemin 3'e ait suya doygun numuneler üzerinde 218, 525, 1026 ve 2095 kPa normal gerilmeler altında deneyler gerçekleştirilmiştir. Direkt kesme test sonuçları Şekil 6'da sunulmuştur.

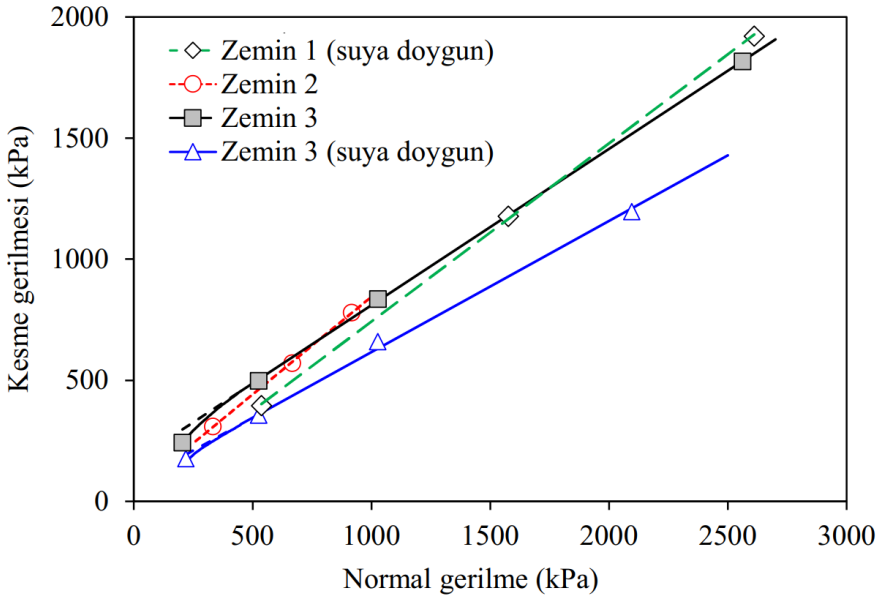
Artan normal yükler altında her yükleme kademesi için gözlenen düşey oturmalar Şekil 6a'da yer almaktadır. Buna göre, her bir zemin tipine ait numunelerin farklı deneylerde benzer sıkışabilirlik davranışı sergilemesi, numune hazırlama yönteminin tekrarlanabilir olduğunu göstermektedir. Alt ve üst kesme kutularının boyutlarının aynı olması nedeniyle, normal ve kesme gerilmeleri, alan düzeltmesi uygulanarak hesaplanmıştır. Kesme gerilmesi ve düşey yer değiştirmenin yatay yer değiştirmeye bağlı değişim grafikleri, tüm direkt kesme deneylerinde maksimum kesme dayanımına ulaşıldığını ve plastik davranış gözlendiğini ortaya koymaktadır. Zemin 3 için gerçekleştirilen suya doygun testlerde, doğal su içerikli numunelere kıyasla aynı normal gerilme mertebesinde daha düşük kesme gerilmesi ve kesme sırasında daha yüksek oturma değerleri elde edilmiştir. Bununla birlikte, suya doygun ve doğal su içerikli Zemin 3 numunelerinin kesme gerilmesi ve oturma davranışları şeklen benzer bir eğilim göstermiştir.



Şekil 6. (a) Direkt kesme deneyi öncesinde normal yük–düşey yer değiştirme ilişkisi, (b) kesme gerilmesi–yatay yer değiştirme ilişkisi ve (c) düşey yer değiştirme–yatay yer değiştirme ilişkisi

Zemin 1, Zemin 2 ve Zemin 3 üzerinde gerçekleştirilen direkt kesme deneylerinden elde edilen Mohr-Coulomb yenilme zarfları Şekil 7'de sunulmaktadır. Buna göre, özellikle Zemin 3 için Mohr-Coulomb yenilme zarfında düşük normal gerilmelerde doğrusal olmayan davranış gözlenmektedir. Testler sırasında uygulanan en düşük normal gerilme olan 205 kPa'daki sonucun, daha yüksek normal gerilmeler altında gözlenen eğilimden belirgin biçimde saptığı görülmektedir. (Şekil 7). Yenilme zarfının seçilen gerilme noktalarına duyarlılığını değerlendirmek amacıyla, en düşük ve en yüksek gerilme noktaları hariç bırakılarak iki farklı doğrusal uyum gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. 205, 525 ve 1028 kPa normal gerilme değerlerine ait veriler kullanıldığında kohezyon 105 kPa, içsel sürtünme açısı 36° olarak bulunurken, 525, 1028 ve 2562 kPa verileri kullanıldığında bu değerler sırasıyla 165 kPa ve yaklaşık 33° olmaktadır. Doğrusal zarfın belirlenmesinde en düşük iki gerilme seviyesinde yapılan test sonuçları dikkate alınmış olsaydı, içsel sürtünme açısı yaklaşık 39° olarak belirlenmiş olacaktı. Bu sonuç, sahadaki mevcut duruma uygun yüksek gerilme aralığının deneysel olarak temsil edilmemesi durumunda içsel sürtünme açısının tasarım açısından elverişsiz yönde yüksek tahmin edilebileceğini göstermektedir.

Mohr-Coulomb yenilme zarfındaki doğrusal olmayan davranış; normal gerilme seviyesine bağlı olarak dilatansın değişmesi, yüksek gerilme seviyelerinde dane kırılmasının belirginleşmesi ve buna bağlı olarak danelerin yeniden düzenlenmesi ile dane temas koşullarındaki değişimlerle ilişkilendirilmektedir.

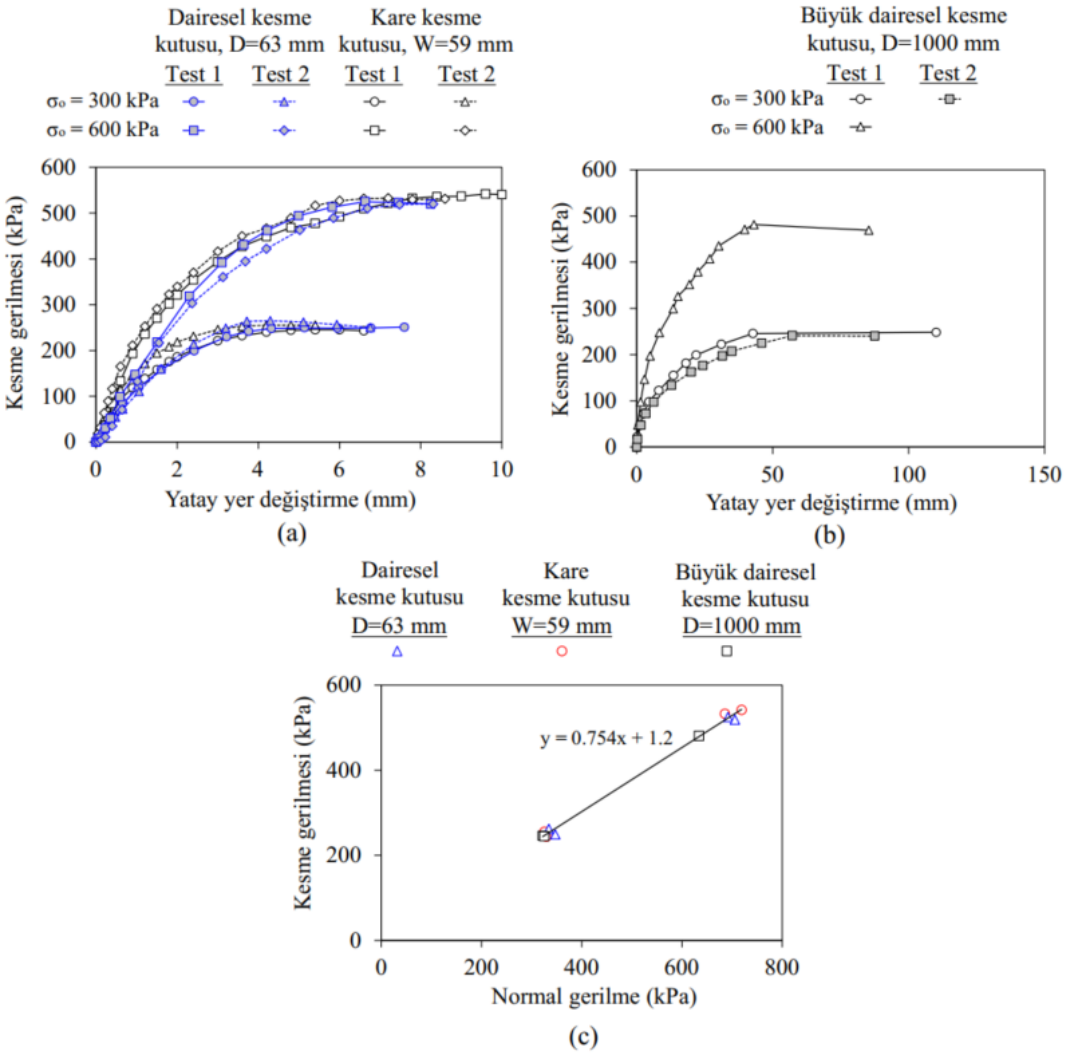


Şekil 7. Zemin 1, Zemin 2 ve Zemin 3 için Mohr-Coulomb yenilme zarfları

Düzenekle yapılan test sonuçlarının tekrarlanabilirliğini değerlendirmek ve küçük ölçekli düzeneklerle elde edilen sonuçlarla karşılaştırmak amacıyla, ince dane içeriği olmayan kumdan oluşan Zemin 4 kullanılmıştır (Şekil 5). Maksimum dane boyutu yaklaşık 2 mm olan bu zemin, 1000 mm çaplı büyük kutunun yanı sıra, 63 mm çaplı dairesel ve 59 mm kenarlı kare kesme kutularında da test edilmiştir. Küçük ölçekli deneyler iki farklı laboratuvarda, 300 ve 600 kPa başlangıç normal gerilmelerinde (σ_o) ikişer kez; büyük ölçekli deneyler ise 300 kPa başlangıç normal gerilmesinde (σ_o) iki tekrarlı ve 600 kPa başlangıç normal gerilmesinde (σ_o) bir kez gerçekleştirilmiştir. Tüm numuneler aynı başlangıç kuru yoğunluğunda hazırlanmıştır (Tablo 1).

Karşılaştırma test sonuçları Şekil 8'de sunulmaktadır. Bulgular, küçük ve büyük ölçekli deney sonuçlarının tutarlı ve tekrarlanabilir olduğunu göstermektedir. Küçük ölçekli deneylerde aynı koşullarda tekrarlanan testlerin maksimum kayma dayanımı farkı %1.2–%5 arasında kalmıştır. Aynı başlangıç normal gerilmesi altında, farklı laboratuvarlarda dairesel ve kare kesme kutularıyla elde edilen maksimum kayma dayanımları arasındaki fark ise %1.4–%7.0 aralığındadır. Buna göre, incelenen zemin için küçük ölçekli deneylerde farklı kesme kutusu geometrilerinin sonuçlar üzerinde belirgin bir etkisi bulunmamaktadır. Büyük ölçekli deneylerde ise 300 kPa başlangıç normal gerilmesinde tekrarlanan deneylerin maksimum kayma dayanımı farkı yaklaşık %2 olarak görülmektedir (Şekil 8b).

Zemin 4 ile gerçekleştirilen tüm direkt kesme deney sonuçları normal gerilme ve kesme gerilmesi ile birlikte grafiklendiğinde ortaya çıkan Mohr-Coulomb yenilme zarfından 1.2 kPa kohezyon ve 37° içsel sürtünme açısı elde edilmiştir (Şekil 8c). Küçük ölçekli dairesel, küçük ölçekli kare ve büyük ölçekli kutularda yapılan testlerden belirlenen içsel sürtünme açıları arasındaki farkın 1°'den küçük olduğu gözlenmektedir. Elde edilen sonuçlar, geliştirilen düzeneğin aynı malzeme ve koşullarda tekrarlanabilir sonuç ürettiğini ve küçük ölçekli deneylerle uyumlu olduğunu göstermektedir.



Şekil 8. Zemin 4 için deney sonuçları: (a) dairesel (D=63 mm) ve kare (W=59 mm) kesme kutuları, (b) D=1000 mm kesme kutusu ve (c) tüm deneyler için Mohr-Coulomb yenilme zarfı.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, iri daneli zeminlerin yüksek normal gerilme ve suya doygunluk koşullarında direkt kesme deneylerine olanak sağlayan bir ekipmanın tasarımı ve performans değerlendirmesi sunulmuştur. Düzenek, 1.0 m ve 1.5 m çapındaki kesme yüzeylerine uygun olarak tasarlanmış olup, 1.0 m çapındaki kesme kutusu kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde 2600 kPa'ın üzerinde normal gerilme seviyelerine ulaşılmıştır.

Betonarme havuz biçiminde tasarlanmış reaksiyon sistemi suya doygun numunelerin test edilmesini mümkün kılarken, düzeneğin zemin seviyesinin altına yerleştirilmesi numune hazırlama ve test süreçlerinde operasyonal kolaylık sağlamıştır. Yarı açık alt kutu geometrisi, kesme yükünün kesme düzlemine herhangi bir eksantrisite oluşmaksızın doğrudan aktarılmasını ve kesme yönünde büyük yer değiştirmelerin gerçekleşmesini mümkün kılmıştır. Alt ve üst kutu arasındaki açıklığın, normal yük uygulanmasının ardından üst kutunun kaldırılması yerine çıkarılabilir kutu ayırma aparatları kullanılarak oluşturulması, büyük ölçekli direkt kesme deneylerinde ve yüksek normal yükler altında yüklerin doğru uygulanmasını ve kesme düzleminin daha kontrollü bir şekilde oluşturulmasını numune bütünlüğünü bozmadan sağlamıştır.

Büyük ölçekli deneylerin tekrarlı testlerde tutarlı sonuçlar verdiği ve küçük ölçekli kesme kutuları kullanılarak gerçekleştirilen deneylerle karşılaştırıldığında uyumlu sonuçlar ortaya koyduğu görülmüştür. Elde edilen bulgular, Mohr–Coulomb yenilme zarfının doğrusal olmayan bir davranış sergilediğini ve yüksek gerilme seviyelerinde dane kırılmasının kayma dayanımı üzerindeki etkisinin daha belirgin hâle geldiğini ortaya koymaktadır. Bu çalışmada gözlenen sonuçlar, güvenilir kayma dayanımı parametrelerinin belirlenebilmesi için, direkt kesme deneylerinin sahadaki gerilme ve suya doygunluk koşullarını mümkün olduğunca temsil edecek şekilde gerçekleştirilmesinin önemini vurgulamaktadır.

KAYNAKLAR

Andjelkovic, V., Pavlovic, N., Lazarevic, Z., Radovanovic, S. (2018), "Modelling of shear strength of rockfills used for the construction of rockfill dams", Soils and Foundations, Vol. 58 (4), 881–893.

ASTM D3080-04. (2004), "Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions", ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

Deiminiat, A., Li, L., Zeng, F. (2022), "Experimental study on the minimum required specimen width to maximum particle size ratio in direct shear tests", Civil Engineering Journal, Vol. 3 (1), 66–84.

Desrues, J., Viggiani, G. (2004), "Strain localization in sand: an overview of the experimental results obtained in grenoble using stereophotogrammetry", International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 28 (4), 279–321.

Ekici, A., Toker, N. K., Tuç, E., Pamuk, Ö. C. (2026), "Development of a high-capacity apparatus with a novel structural design for large-scale direct shear testing of soils", Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol. 18 (8), 6606-6621.

Fu, W., Zheng, X., Lei, X., Deng, J. (2015), "Using a modified direct shear apparatus to explore gap and size effects on shear resistance of coarse-grained soil", Particuology, Vol. 23, 82–89.

Gupta, A.K. (2016), "Effects of particle size and confining pressure on breakage factor of rockfill materials using medium triaxial test", Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol. 8 (3), 378–388.

Hardin, B.O. (1985), "Crushing of soil particles", Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 111 (10), 1177–1192.

Ladd, R.S. (1978), "Preparing test specimens using undercompaction", Geotechnical Testing Journal, Vol. 1 (1), 16–23.

Maksimovic, M. (1989), "Nonlinear failure envelope for coarse-grained soils", 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio De Janeiro, Brazil, 731–734.

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
σ	Normal gerilme	w	Su muhtevası
LL	Likit limit	PL	Plastik limit
PI	Plastisite indisi	ρ_{dry}	Kuru yoğunluk
B_r	Bağıl kırılma değeri	B_t	Toplam dane kırılması
B_p	Dane kırılma potansiyeli	σ_o	Başlangıç normal gerilmesi
D	Kesme kutusu çapı	W	Kesme kutusu kenar boyu
D_{50}	Ortalama dane çapı		